

УДК 621.923

Братан С. М., Сидоров Д. Е., Столяров Н. Н.

**АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ
«ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ»**

Аннотация. В статье рассмотрены свойства динамической системы «технологический процесс плоского шлифования». Приведены динамические модели операции, учитывающие воздействие на систему внутренних возбуждающих сил, вызванные остаточным дисбалансом шлифовального круга, а также отклонениями форм инструмента и заготовки в зоне их взаимодействия. Приведены частные примеры амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и фазочастотных характеристик (ФЧХ), а также построены переходные процессы, характеризующие динамические свойства процесса плоского шлифования.

Ключевые слова: плоское шлифование, динамическая модель, технологический процесс, переходный процесс.

Братан С. М., Сидоров Д. Е., Столяров М. М.

**АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМИ
«ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ПЛОСКОГО ШЛІФУВАННЯ»**

Анотація. У статті розглянуті властивості динамічної системи «технологічний процес плоского шліфування». Наведено динамічні моделі операції, що враховують вплив на систему внутрішніх збуджуючих сил, викликані залишковим дисбалансом шліфувального круга, а також відхиленнями форм інструменту та заготовки в зоні їх взаємодії. Наведено приватні приклади амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) і фазочастотних характеристик (ФЧХ), а також побудовані перехідні процеси, що характеризують динамічні властивості процесу плоского шліфування.

Ключові слова: плоске шліфування, динамічна модель, технологічний процес, перехідний процес.

Bratan S. M., Sidorov D. E., Stolyarov N. N.

**ANALYSIS OF DYNAMIC PROPERTIES OF SYSTEM
«TECHNOLOGICAL PROCESS OF FLAT GRINDING»**

Summary. The article deals with the properties of a dynamic system «process of flat grinding». All of the elements of the technological system of the grinding wheel and the workpiece undergoing significant changes

in a relatively short time are revealed. The status of the tool has a significant impact on the course of technological process, since the profile of the tool copies on the surface of the workpiece. For example, the increase in variance form of a circle equivalent to the dynamic of the application of dimensional parameters, which leads to additional perturbation of the dynamic system of the machine, and should therefore increase the roughness and waviness of the workpiece, the formation on the surface of the defect layer, which at the end of tool life can be increased several times. The dynamic model of the operation is given, taking into account the effect on the system of internal excitatory forces caused by residual disbalance grinding wheel, as well as deviations of the form tool and the workpiece in the area of their interaction. See examples of amplitude-frequency characteristics (AFC) and phase-frequency characteristics (PFC), as well as built transients characterizing the dynamic properties of the surface grinding process.

The analysis and synthesis using the methodological approach adopted in this paper generated a mathematical model of a dynamical system, for which adequate description of flat grinding process must be supplemented dynamically characterizing the statistical properties of the grinding wheel. To eliminate the above-mentioned non-possessions, one must use an adaptive feedback system, adequately assessing the current state of the technical system.

Key words: surface grinding, dynamic model, technology process, transition process.

Постановка проблемы. Качество обрабатываемых изделий в существенной степени зависит как от качества заготовки, технологии обработки, динамики станка, так и от качества инструмента.

Анализ литературы. Исследования операций шлифования показывают [1], что, как правило, в начальный момент времени при правильном подборе характеристик инструмента, режимов резания, оптимальном построении цикла шлифования обеспечиваются заданные параметры точности и шероховатости поверхности детали. Из всех элементов технологической системы только шлифовальный круг и заготовка претерпевают существенные изменения в относительно короткий промежуток времени. Изменение состояния инструмента оказывает существенное влияние на ход технологического процесса, так как профиль инструмента копируется на поверхности заготовки. Например, увеличение отклонений формы круга эквивалентно динамическому изменению размерных параметров, что приводит к дополнительным возмущениям динамической системы станка, и, следовательно, увеличению шероховатости и волнистости детали, образованию на ее поверхности дефектного слоя, которые в конце периода стойкости инструмента могут возрасти в несколько раз.

Наличие колебаний в отклонениях расположения и шероховатости поверхности объясняются возмущающими воздействиями в технологических процессах, вызванных нестабильностью технологической системы. То есть нестабильность параметров деталей определяется воздействием в процессе их производства на технологическую систему (ТС) изменяющихся внешних факторов, часть из которых неизвестна и не контролируется в процессе обработки. Эта проблема особенно актуальна для финишных операций, на которых окончательно формируются параметры

качества готовых изделий и которые наиболее чувствительны к возмущающим воздействиям [2].

Учет изменения и оценка воздействия возмущающих факторов на технологический процесс требует построения математического описания. К такому описанию необходимо отнести динамические модели технологического процесса и соответствующие математические модели воздействующих факторов, построение которых и является **целью** данной статьи.

Изложение основного материала. Динамику процесса плоского шлифования полнее всего отражает нормальная сила шлифования. В состав такой силы входит ее среднее значение, составляющие, вызванные остаточным дисбалансом шлифовального круга, а также отклонениями форм инструмента, и заготовки в зоне их взаимодействия.

На рис. 1 представлена эквивалентная схема динамической системы плоскошлифовального станка.

Величина среднего значения нормальной силы шлифования зависит от средних значений взаимоположения центра шлифовального круга и поверхности заготовки и определяется технологическими режимами и параметрами жесткости c_1 и c_3 обработки. В свою очередь, она определяет среднее значение перемещений упругой системы станка, которое может быть идентифицировано и учтено на этапе разработки технологического процесса.

Составляющие, вызванные динамическим проявлением эффектов дисбаланса и отклонениями форм шлифовального круга и заготовки, приводят к соответствующим отклонениям от номинального (спроектированного) технологического режима обработки и, следовательно, к отклонениям в показателях качества обработанной поверхности.

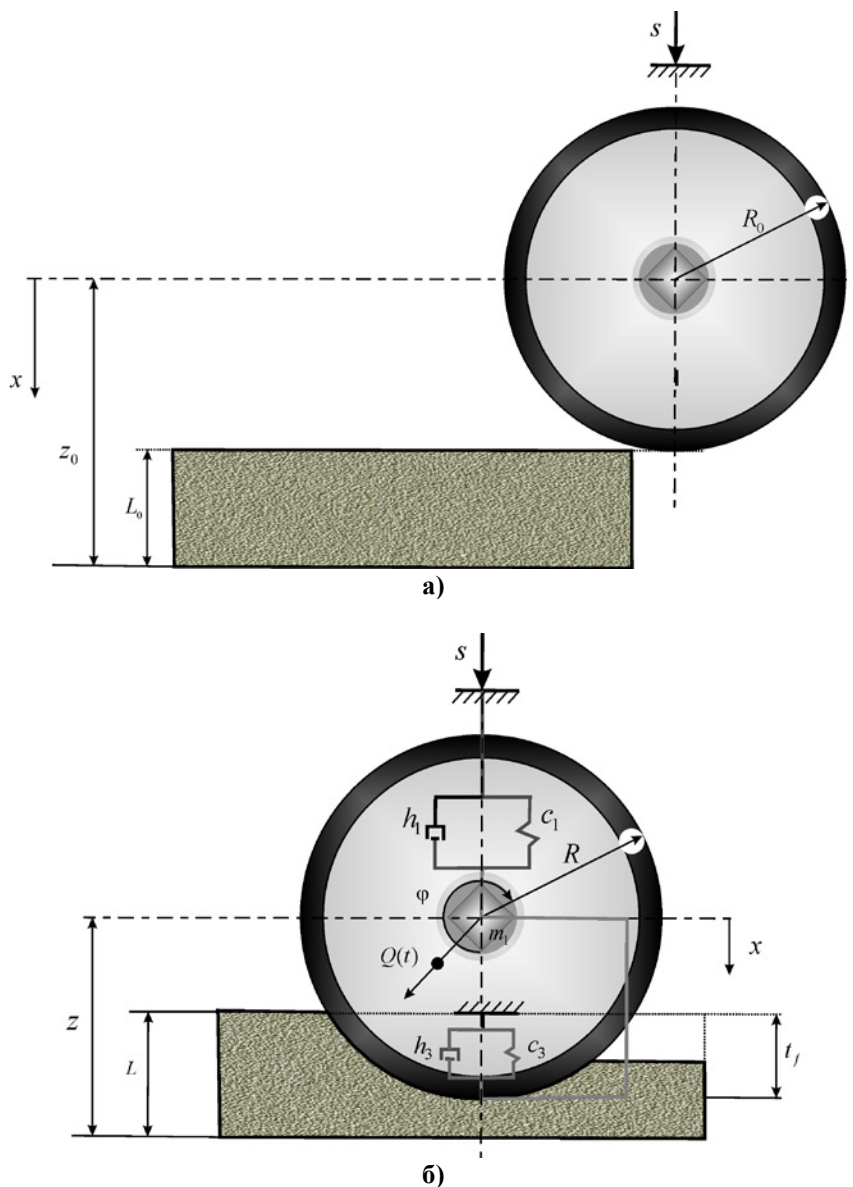


Рис. 1. Эквивалентная схема динамической системы плоского шлифования.

С использованием принципа Даламбера с учетом того, что обрабатываемая деталь жестко закреплена, модель динамики процесса плоского шлифования представлена в виде

$$m_1 \ddot{x} + h_1 \dot{x} + c_1 x = -h_3 \dot{t}_f - c_3 t_f + h_1 \dot{s} + c_1 s, \quad (1)$$

где m_1 – приведенная масса шлифовального круга и шлифовальной бабки;

h_1 – приведенный коэффициент демпфирования шлифовального круга;

c_1 – приведенная жесткость шлифовального круга и шлифовальной бабки;

h_3 – демпфирование зоны контакта шлифовального круга с деталью;

c_3 – жесткость зоны контакта шлифовального круга с деталью;

x – координата перемещения центра вращения шлифовального круга;

s – перемещение шлифовального круга в направлении подачи;

t_f – фактическая глубина резания.

Фактическая глубина резания [2] (размер зоны контакта заготовки с инструментом по линии центров), согласно рис. 1, определяется

$$t_f = R + L - z, \quad (2)$$

где L – толщина заготовки (расстояние от стола до поверхности детали);

R – радиус шлифовального круга по направлению к обрабатываемой детали;

z – текущее расстояние от базовой поверхности до центра вращения шлифовального круга.

$$z = z_0 - x, \quad (3)$$

где z_0 – расстояние от базовой поверхности до центра вращения шлифовального круга в начальный момент времени ($z_0 = R_0 + L_0$).

При условии отсутствия дисбаланса (центр вращения совпадает с центром масс), толщина детали L и радиус шлифовального круга R имеют отклонения от номинальных значений, т. е.

$$L = L_0 + \Delta L, \quad R = R_0 + \Delta R.$$

После подстановки (2), (3) в соотношение (1) получим:

$$m_1\ddot{x} + h_1\dot{x} + c_1x = -h_3(\dot{L} + \dot{R} + \dot{x}) - c_3(L_0 + \Delta L + R_0 + \Delta R - z_0 + x) + h_1\dot{s} + c_1s. \quad (4)$$

Если вращение шлифовального круга осуществляется не вокруг центра масс, то возникает сила, характеризующая влияние дисбаланса.

С учетом дисбаланса $Q(t)$ равенство (4) примет вид

$$m_1\ddot{x} + h_1\dot{x} + c_1x = -h_3(\dot{L} + \dot{R} + \dot{x}) - c_3(L_0 + \Delta L + R_0 + \Delta R - z_0 + x) + h_1\dot{s} + c_1s + Q(t). \quad (5)$$

Обозначим $L_1 = (L_0 + \Delta L - z_0)$, тогда

$$m_1\ddot{x} + h_1\dot{x} + c_1x = -h_3(\dot{L} + \dot{R} + \dot{x}) - c_3(L_1 + R + x) + h_1\dot{s} + c_1s + Q(t). \quad (6)$$

Перепишывая выражение (6) в изображениях по Лапласу, получим

$$m_1p^2x + h_1px + c_1x = -h_3(L_1p + Rp + xp) - c_3(L_1 + R + x) + h_1ps + c_1s + Q(p).$$

Сила, вызываемая дисбалансом, в операторной форме имеет вид

$$Q(p) = \frac{P_{\max} \cdot T_2}{1 + T_2^2 p^2} \cdot [T_2 p \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0], \quad (7)$$

где $T_2 = \frac{1}{\omega}$; ω – частота вращения шлифовального круга;

φ_0 – угол начального положения дисбаланса относительно точки контакта с деталью.

Можно отметить, что второй множитель выражения (7) при моделировании отвечает за фазовый сдвиг гармонических колебаний, характеризующих влияния эффекта дисбаланса шлифовального круга, соответствующих его начальному положению относительно точки контакта.

Уравнение в операторной форме запишется в следующем виде

$$(m_1p^2 + (h_1 + h_3)p + (c_1 + c_3))x = -h_3(L_1p + Rp) - c_3(L_1 + R) + h_1ps + c_1s + Q(p). \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет осуществить анализ динамической системы «технологический процесс плоского шлифования».

Важным элементом классического подхода к динамическому анализу систем является выбор наиболее подходящего метода исследования модели [3]. Выбор необходимо производить при широком спектре частот возбуждения колебаний, чему в наибольшей степени отвечают частотные методы исследований по амплитудно-частотным характеристикам, построение которых предполагает получение из дифференциальных уравнений движения передаточных функций.

Для получения передаточных функций и построения АЧХ целесообразно использование пакетов прикладных программ, например, «Marle 10» или подобных, позволяющих получить решение системы дифференциальных уравнений в аналитическом виде и графическое изображение АЧХ и ФЧХ.

В общем виде АЧХ, описываемая функцией $A(\omega)$, равна отношению амплитуды выхода к амплитуде входа динамической системы станка. Входом является амплитуда внешнего воздействия

$$A_h(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)}, \quad (9)$$

и фаза

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)}. \quad (10)$$

Приведенное уравнение (8) увязывает динамические параметры системы (силы, массы, же-

сткости, коэффициенты демпфирования, перемещения) и позволяет получить аналитическое решение для амплитудно-частотных и фазовых характеристик с целью оценки воздействия на процесс основных источников колебаний.

Например, для оценки влияния неточности перемещения шлифовального круга на координату центра шлифовального круга легко получить аналитические выражения вещественной частотной характеристики

$$\text{Re}(\omega) = \frac{A_2}{A_1}, \quad (11)$$

где $A_1 = 2\omega^2 \cdot \left((h_1 \cdot h_3 - m_1 \cdot A_1) + \frac{1}{2} \cdot A_2 \right) + (c_1 + c_3)^2$,

$A_2 = \omega^2 \cdot (-c_3 \cdot m_1 + h_1 \cdot h_3 + h_1^2) + c_3 \cdot (c_1 + c_3)$,

и мнимой частотной характеристики

$$\text{Im}(\omega) = \frac{A_3}{A_1}, \quad (12)$$

где $A_3 = ((c_1 - m_1 \cdot \omega^2) \cdot h_3 - h_1 \cdot c_3) \cdot \omega$.

После подстановки (11) и (12) в (9) и (10) получим аналитические зависимости для расчета АЧХ

$$A(\omega) = 20 \log \sqrt{A_h(\omega)},$$

$$A(\omega) = 10 \ln \left(\frac{h_3^2 \cdot \omega^2 + c_3^2}{A_1} \right) \quad (13)$$

и ФЧХ

$$\varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{A_3}{A_2} \right). \quad (14)$$

Для возможности сравнения АЧХ вертикальной подачи, отклонения формы шлифовального круга, влияния вертикальной подачи на АЧХ и ФЧХ процесса плоского шлифования приняли такие численные значения постоянных в

уравнениях (11)–(14): $h_1 = 1 \cdot 10^3$ Н·с/м, $c_1 = 2 \cdot 10^5$ Н/м, $h_3 = 2 \cdot 10^3$ Н·с/м, $c_3 = 2 \cdot 10^4$ Н/м.

На рис. 2 и 3 показаны полученные АЧХ и ФЧХ для четырех значений масс: 100 кг, 200 кг, 250 кг, 300 кг.

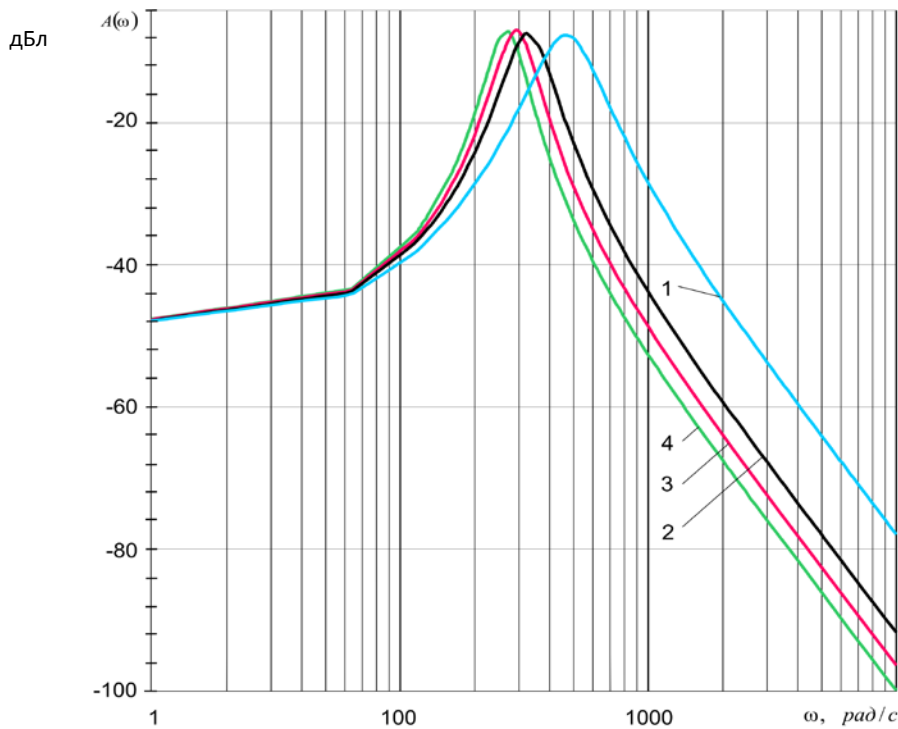


Рис. 2. Влияние массы шлифовальной бабки и шлифовального круга на АЧХ процесса плоского шлифования ($h_1 = 1 \cdot 10^3$ Н·с/м, $c_1 = 2 \cdot 10^5$ Н/м, $h_3 = 2 \cdot 10^3$ Н·с/м, $c_3 = 2 \cdot 10^4$ Н/м):
1 – $m_1 = 100$ кг; 2 – $m_2 = 200$ кг; 3 – $m_3 = 250$ кг; 4 – $m_4 = 300$ кг.

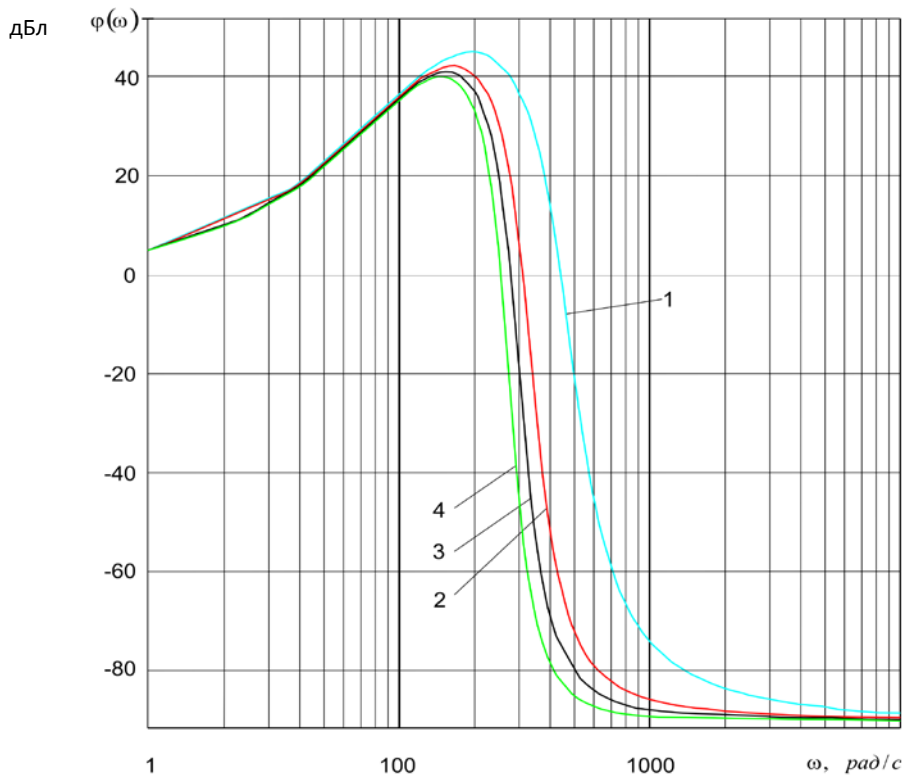


Рис. 3. Влияние массы шлифовальной бабки и шлифовального круга на ФЧХ процесса плоского шлифования ($h_1 = 1 \cdot 10^3$ Н·с/м, $c_1 = 2 \cdot 10^5$ Н/м, $h_3 = 2 \cdot 10^3$ Н·с/м, $c_3 = 2 \cdot 10^4$ Н/м):
1 – $m_1 = 100$ кг; 2 – $m_2 = 200$ кг; 3 – $m_3 = 250$ кг; 4 – $m_4 = 300$ кг.

Влияние отклонений формы шлифовального круга на АЧХ процесса плоского шлифования приняты следующие численные значения постоянных в уравнениях (11)–(14): $h_1 = 5 \cdot 10^3$ Н·с/м,

$h_3 = 0,2 \cdot 10^3$ Н·с/м, $c_1 = 2 \cdot 10^5$ Н/м, $c_3 = 2 \cdot 10^4$ Н/м. На рис. 4 показаны полученные АЧХ и ФЧХ для четырех значений масс: 100 кг, 200 кг, 250 кг, 300 кг.

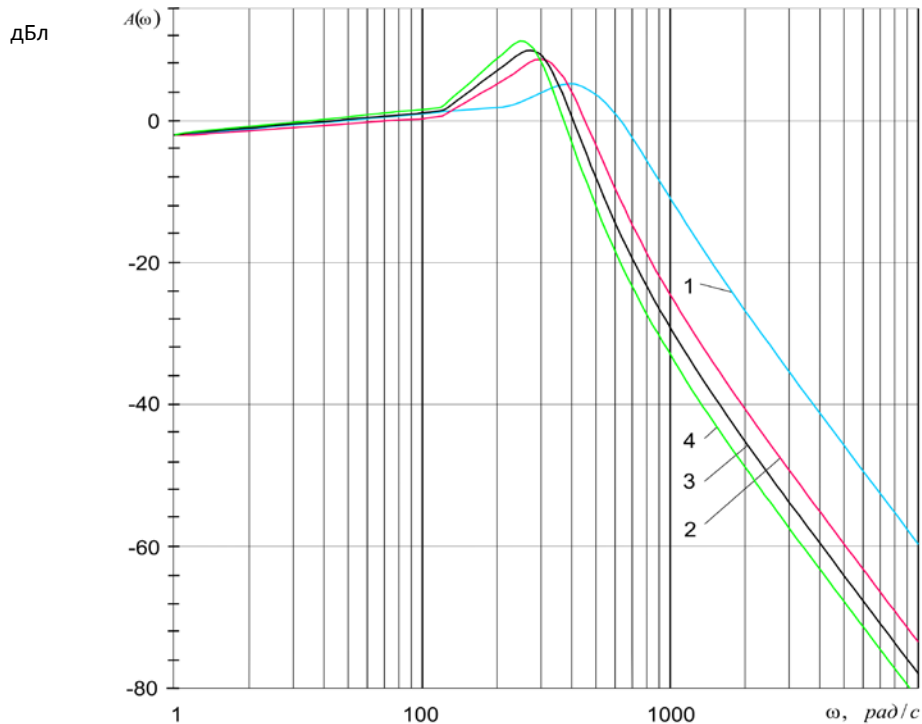


Рис. 4. Влияние ΔR на АЧХ процесса плоского шлифования ($h_1 = 5 \cdot 10^3$ Н·с/м, $h_3 = 0,2 \cdot 10^3$ Н·с/м, $c_1 = 2 \cdot 10^5$ Н/м, $c_3 = 2 \cdot 10^4$ Н/м): 1 – $m_1 = 100$ кг; 2 – $m_2 = 200$ кг; 3 – $m_3 = 250$ кг; 4 – $m_4 = 300$ кг.

АЧХ позволяют оценить устойчивость процесса для различных его параметров.

Поскольку при построении и анализе АЧХ в качестве обобщенной координаты принято изменение глубины шлифования, амплитудой выхода является амплитуда гармонического изменения

глубины шлифования. На практике данная амплитуда практически будет равна наибольшему отклонению глубины шлифования Δt_f от заданной технологией величины, что можно проследить по переходному процессу (рис. 5).

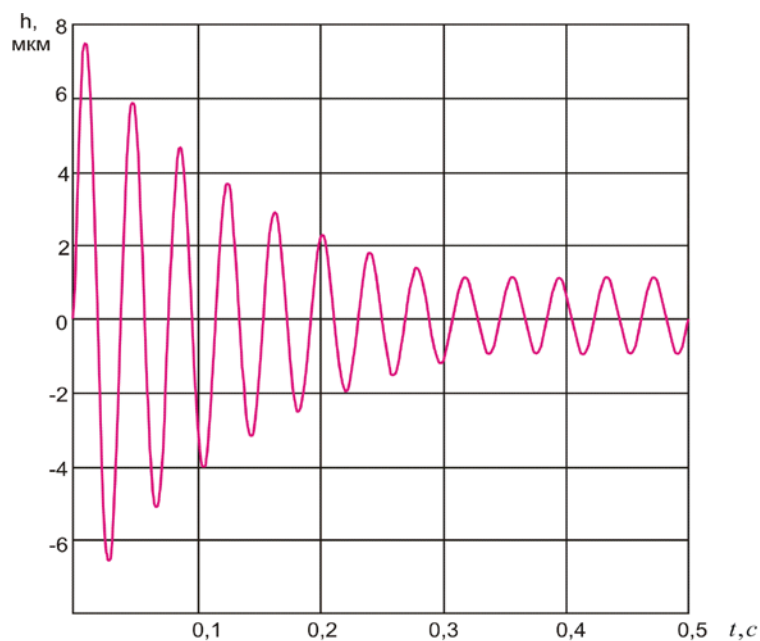


Рис. 5. Переходный процесс при врезании круга в заготовку на операциях плоского шлифования с параметрами $h_1 = 5 \cdot 10^3$ Н·с/м, $c_1 = 2 \cdot 10^5$ Н/м, $c_3 = 2 \cdot 10^4$ Н/м, $h_3 = 0,2 \cdot 10^3$ Н·с/м, $m_1 = 200$ кг.

Из графика на рис. 5 видно, что при величине подачи 0,01 мм максимальное отклонение глубины шлифования, учитывая этап первого всплеска, составляет $\approx 0,007$ м, время переходного процесса – 0,3 секунды.

Однако для реального процесса шлифования отклонения радиуса шлифовального круга не постоянны. Вследствие того, что круг имеет отклонения формы, состояние системы непрерывно изменяется. При контактировании вращающегося круга с материалом заготовки возникают вынужденные колебания, учет которых требует построения дополнительного динамического звена, характеризующего статистические свойства шлифовального круга.

Выводы. В результате анализа и обобщения существующих математических моделей сформирована математическая модель динамической системы, которая для адекватного описания процесса плоского шлифования должна быть дополнена динамическим звеном, характеризующим статистические свойства шлифовального круга.

Для устранения вышеуказанных недостатков необходимо использование адаптивных систем с

обратной связью, адекватно оценивающих текущее состояние технологической системы, что является предметом дальнейших исследований в данной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
2. Братан С. М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования : дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / Сергей Михайлович Братан. – Одесса, 2006. – 321 с.
3. Богуцкий В. Б. Особенности процесса шлифования и заточки в условиях перекрещивающихся осей инструмента и детали / В. Б. Богуцкий, С. М. Братан // Міжнародна науково-технічна конференція «Машинобудування – очима молодих», Кременчук, 30 жовтня – 1 листопада 2013 р. : матеріали конференції. – Кременчук : КрНУ ім. М. Остроградського, 2013. – С. 37–39.